

泰国蒙河流域水沙变化趋势及影响因素

李朝月^{1,2} 方海燕^{1,2*}

(¹中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; ²中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要 水沙变化是影响泰国社会经济发展的重要因素。基于湄公河支流蒙河流域下游乌汶水文站 1980—2014 年径流量和输沙量监测数据, 运用线性回归、Mann-Kendall 及小波变化等方法分析了水沙序列的演变规律, 探讨了流域水沙变化的驱动力。结果表明: 研究期间, 蒙河流域年径流量呈微弱增加趋势, 输沙量呈减少趋势; 2000 年以前, 输沙量与径流量保持同步变化, 但 2000 年以来输沙量显著减少; 汛期径流量和输沙量均呈下降趋势。水沙突变点的发生年份不完全一致, 径流量的突变点分别发生在 1999、2006 和 2011 年, 而输沙量的突变点为 1986、1999 和 2011 年。径流量变化的主周期依次为 14、8 和 4 年, 输沙量的主周期依次为 32、12、9 及 4 年, 除输沙量 32 年变化周期外, 水沙变化周期基本一致, 均与南方涛动、地极移动、太阳黑子活动等因素有关。月径流量与输沙量具有显著的相关关系。海-气作用和人类活动是流域水沙变化的重要影响因素。厄尔尼诺和拉尼娜与流域降雨关系密切, 并直接影响流域水沙变化。2000 年以来, 流域内建设用地面积增加, 林地面积减少, 流域产流能力提高, 而水库大坝的建设导致流域汛期径流量和输沙量减少, 抵消了林地减少对输沙量增加的影响。

关键词 蒙河流域; 水沙变化; 突变; 主周期; 气候变化; 人类活动

Variation trend and the influencing factors of runoff and sediment flux in the Mun River Basin, Thailand. LI Chao-yue^{1,2}, FANG Hai-yan^{1,2*} (¹Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: The variations of runoff and sediment flux are important factors influencing the socio-economic development of Thailand. Based on the dataset of runoff and sediment flux during 1980–2014 at the Ubon hydrological station in the lower Mun River, a tributary of the Mekong River, the temporal variations of runoff and sediment flux were analyzed with the linear regression method, Mann-Kendall test, and wavelet transform method. The driving forces for the variations of runoff and sediment flux were discussed. The results showed that annual runoff in the Mun River basin increased slightly, while the sediment flux presented a decreasing trend. The changes of sediment flux and runoff were consistent before 2000. However, the sediment flux significantly decreased after 2000. During the study period, both the runoff and sediment flux during the flood seasons showed decrease trend. The abrupt change points of runoff and sediment flux did not occur in the same year, which were in 1999, 2006 and 2011 for runoff and in 1986, 1999 and 2011 for sediment, respectively. The main cycles of runoff amount were 14, 8 and 4 years, respectively, while those of sediment flux were 32, 12, 9 and 4 years, respectively. Except for the 32-year cycle of sediment flux, the main cycles of runoff and sediment flux were almost similar and both were mainly related to the Southern Oscillation, polar movement, sunspot activity, and other factors. There was a significant correlation between monthly runoff and sediment flux. Sea-air interaction and human activity were important

本文由中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20060402)和国家自然科学基金项目(41977066)资助 This work was supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (A) (XDA20060402) and the National Natural Science Foundation of China (41977066).

2019-07-23 Received 2019-11-15 Accepted Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanghy@igsrr.ac.cn

factors influencing runoff and sediment flux in the Mun River basin. El Nino and La Nina were closely related to rainfall which in turn affected the runoff and sediment flux in the basin. Since 2000, the construction area increased and the forest area decreased, which increased the runoff in the basin, while the reservoirs and other engineering measures reduced the runoff and sediment flux, and thus offset the impact of decreased forest lands on sediment flux.

Key words: Mun River Basin; variation of runoff and sediment flux; abrupt change; main cycle; climate change; human activity.

河流系统是气候和土地利用等因素协同作用下的弹性系统,水沙是该系统最基本、最活跃的物理要素^[1]。水沙变化一直是水利工程、河流地貌、生态系统安全等领域备受重视的科学问题,水沙变化研究为河流水文循环和河道泥沙沉积提供了重要参考。在全球气候变化背景下,人类活动引起土地利用变化导致全球河流的水沙状况发生了显著变化,对流域水资源配置、地貌演变及全球地球化学循环产生不可忽视的影响。近几十年来,受自然因素(气候变化)和人类活动干扰影响(水库建设、土地利用变化、调水采沙等),埃及尼罗河^[2]、中国珠江^[3]、东南亚湄公河^[4]、美国密西西比河^[5]等水系的流量和输沙量发生重大变化。因此,自然要素和人类活动驱动下的水沙变化已成为水科学研究的热点内容之一。

国内外学者基于流域水沙变化的主要通量——径流量和输沙量,对水沙变化特征、演变规律和影响因素进行了大量研究。有研究发现,世界上主要河流中约有一半河流输沙量呈减少趋势^[6],区域气候变化^[7]及人类活动^[8]的耦合作用是主要驱动因素,但主要原因是人类活动。Zhang 等^[9]对长江流域的水沙变化分析表明,流域输沙量变化明显,水库是泥沙减少的主要原因。黄河曾经是世界上最大的河流泥沙载体,但过去 60 年输沙量减少了约 90%,人类活动(梯田、园林、水库、大坝等)是推动泥沙减少的主要因素^[10]。相比输沙量的变化,不同流域径流量变化不一,黄河流域出现径流量减少现象,长江流域径流量增加^[11],珠江流域入海径流量未发生明显变化^[12]。

泛第三极是全球变化最强烈的地区,受全球变化和人类活动的共同作用,泛第三极地区土壤侵蚀呈增加态势^[13]。泰国作为泛第三极暖湿区的典型区域,是世界十大稻米生产国之一,其中,蒙河流域的农业十分发达。据资料统计,1980—2013 年蒙河下游乌汶站年均输沙量约为 157.38 万 t。自 2000 年以来,受降水和人类活动影响,蒙河流域径流量增加,输沙量急剧下降,流域的河流地貌、生态环境及

农业灌溉用水发生巨大变化。该地区经济和科技相对不发达,缺乏关于流域水沙变化的研究。因此,本研究基于蒙河流域下游乌汶控制站的水沙资料,采用线性趋势、Mann-Kendall 检验、小波变化方法系统分析流域 1980—2014 年径流量和输沙量的变化特征,依据前人研究成果及本研究搜集到的气候、土地利用和水库等数据,探讨蒙河流域气候变化和人类活动对流域水文过程影响的机理,该项研究对于科学理解当前环境变化下蒙河流域水沙演变、农业可持续发展及未来水沙优化调控具有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

蒙河位于泰国东北部,是湄公河的最大支流,发源于呵叻府,从西向东流经武里南、素林、乌汶,于乌邦哈坦尼省的空坚汇入湄公河(图 1)。蒙河全长 673 km,流域面积 71060 km²,是泰国目前最大的流域,海拔 17~1309 m,其中,高原和山地位于西南地区,中部和东部地区为平原地带,属优势地貌类型。该流域属于热带草原气候^[14],5 月中旬至 10 月中旬为雨季,年降雨量 800~1800 mm,降雨分布时空差异明显,月平均温度约 27.5 °C。蒙河的雨季平均流量约 959 m³·s⁻¹,旱季平均流量约 367 m³·s⁻¹,多年平均流量 720 m³·s⁻¹,对湄公河的年贡献水量约为 25×10⁹ m³^[15],年平均输沙量 24×10⁵ t。流域主要土地利用类型为耕地,占比高达 77%,其次为林地。

1.2 基础数据

根据流域已有水文站点分布情况(图 1b),考虑数据精确性及序列连续性,选择蒙河干流下游的乌汶站(15°13'18" N, 104°51'42" E)的水沙数据研究蒙河流域的水沙变化特征,其中,水、沙数据时间序列分别为 1980—2014 和 1980—2013 年,由泰国自然资源和环境部水资源司提供。为减少水沙序列的非平稳性及噪声对小波分析的干扰,对径流量和输沙量进行 0~1 标准化处理。为了评价土地利用对流域水沙的影响,本研究收集了流域 2000—2013 年

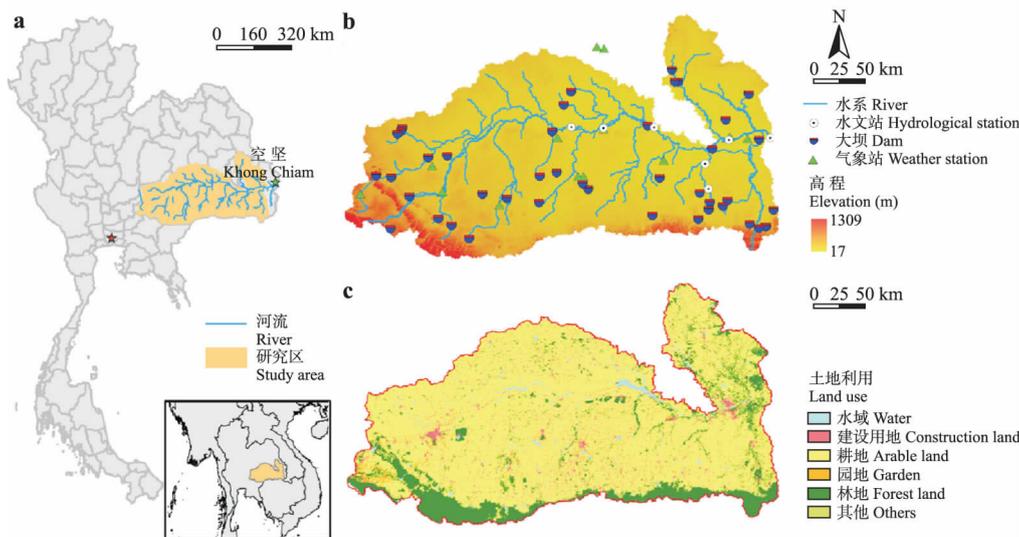


图 1 研究区位置 (a)、高程 (b) 及土地利用类型 (c) 的空间分布

Fig.1 Location of the study area (a), and spatial distributions of elevation (b) and land use types (c). DEM: 数字高程模型 Digital elevation model.

的土地利用数据(图 1c),分辨率为 90 m。选取流域内及邻域 13 个站点的气象数据(图 1b)。为了分析修建水库对水沙变化产生的影响,搜集了泰国水库的库容、数量数据(表 1, <http://www.thaiwater.net/v3/>)。

1.3 研究方法

采用 Mann-Kendall 突变检验法(以下简称 M-K 法)识别蒙河流域降雨、径流量和输沙量时间序列的突变点^[16],该方法适用范围广,以序列平稳为前提条件;采用小波分析来揭示水沙时间序列中隐藏的多种变化周期,其在多种非线性学科中得到广泛应用。

本研究在 M-K 检验中,设一长度为 n 的时间序

表 1 泰国水库详情

Table 1 Detailed information of the reservoirs in Thailand

地区 Region	时间 Time	水库数量 Number of reservoir	库容 Storage capacity ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
北部 North	1980—1999	5	23612
北部 North	1980—2014	7	24715
东北部 Northeast	1980—1999	9	6858
东北部 Northeast	1980—2014	12	8323
中部 Central	1980—1999	2	281
中部 Central	1980—2014	3	1360
西部 West	1980—1999	2	26605
西部 West	1980—2014	2	26605
东部 East	1980—1999	2	281
东部 East	1980—2014	5	1173
南部 South	1980—1999	3	6662
南部 South	1980—2014	4	8150

列 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 构造一秩序列 S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: 当 $x_i - x_j \leq 0$ 时, $r_i = 0$; 当 $x_i - x_j > 0$ 时, $r_i = 1$ 。

统计变量 UF_k 计算公式如下^[17]:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$E(S_k) = k(k+1) / 4 \quad (3)$$

$$\text{Var}(S_k) = k(k-1)(2k+5) / 72 \quad (4)$$

式中: UF_k 为标准正态分布, 给定显著性水平 α_0 , 当 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$, 表明数据序列存在显著变化趋势。将时间序列 X 按逆序排列, 使用上述方法计算, 令 $UB_k = -UF_k$, 当两条曲线相交, 且交点位于临界值之间, 说明该点对应的时间是突变点的开始。本研究采用 0.05 置信水平, 其临界值为 ± 1.96 。

小波函数具有震荡性, 且在短时间内能够衰减为 0, 即 $\Psi(t) \in L^2(R)$ 满足条件:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (5)$$

式中: $\Psi(t)$ 为基小波函数, 基于时间轴平移和尺度域变化构建连续一簇函数为:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (6)$$

对于选定的小波函数, 水沙序列 $f(t)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (7)$$

小波系数平方值在 b 域上积分, 得到小波方差,

即:

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (8)$$

式中: $\Psi_{a,b}(t)$ 为子小波, $a, b \in R, a \neq 0$; a 为尺度因子, 反映周期特征; b 为时间因子, 反映平移特征; $W_f(a,b)$ 为小波变换系数, 是连续小波在尺度 a 、时间 b 上与信号 $f(t)$ 的内积; $\bar{\Psi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的复共轭函数。本研究选择 Morlet 函数^[18], 基于 Matlab 18a 生成小波系数, 借助 Surfer 16.0 采用 Kriging 网格插值方法, 绘制水沙小波系数实部及小波系数模等值线图。

2 结果与分析

2.1 蒙河流域水沙年际变化

由图 2 可知, 1980—2014 年, 蒙河流域年均径流量为 203 亿 m^3 , 年径流量趋于增加。1999 年流域径流量发生显著变化。因此, 将径流量变化过程分为两个阶段: 1980—1999 和 2000—2014 年, 后一阶段的年均径流量(233 亿 m^3) 高于前一阶段(179 亿 m^3)。研究期间, 2000 年径流量最高, 之后呈递减趋势, 2011 年径流量再次出现峰值。1980—2013 年, 蒙河流域年均输沙量为 16×10^5 t, 年输沙量呈减少趋势。1999 年, 流域输沙量发生明显变化。2000 年输沙量最高。1980—1999 年, 流域水沙同步变化, 2000 年以来流域输沙量呈显著下降趋势, 由 521 万 t(2000 年) 减少到 99.2 万 t(2013 年), 年均递减系数为 32.4 万 t, 相比径流量, 2011 年未出现输沙量峰值。

2.2 蒙河流域水沙年内变化

由图 3 可知, 蒙河流域各年代水沙的年内分布

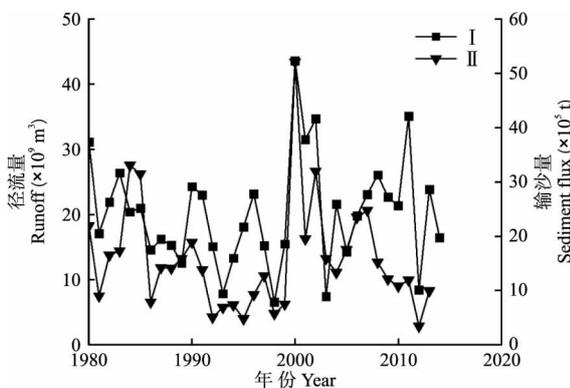


图 2 蒙河流域水沙年际变化
Fig.2 Annual variations of runoff and sediment flux in the Mun River Basin.

I: 径流量 Runoff; II: 输沙量 Sediment flux. 下同 The same below.

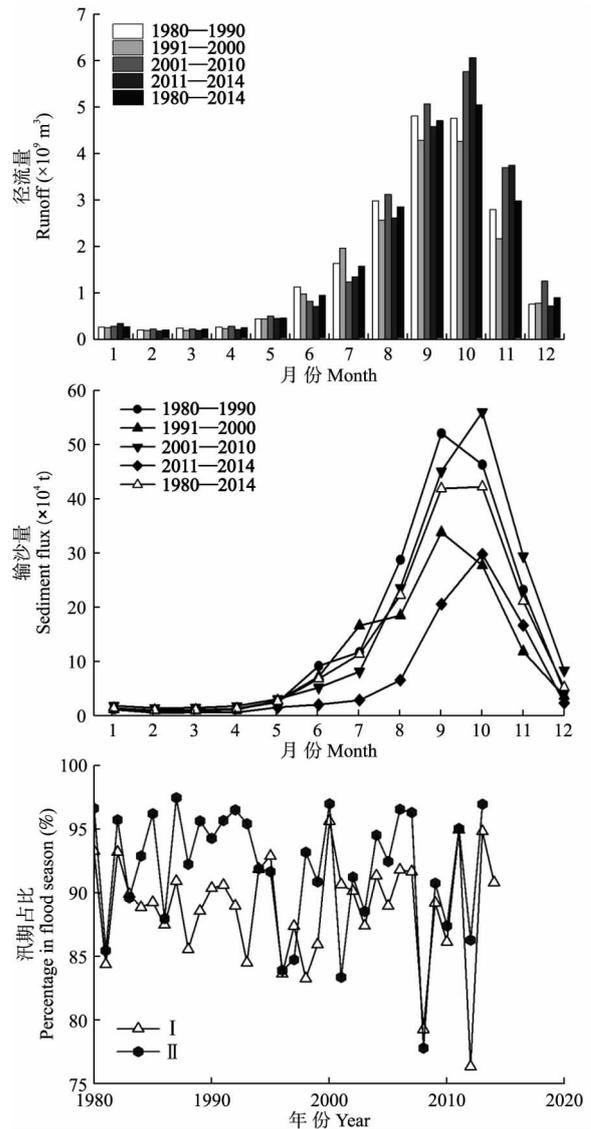


图 3 蒙河流域径流量和输沙量不同时期的月分布及汛期占比

Fig.3 Monthly distribution of runoff and sediment flux in the Mun River Basin in different periods and their percentages during flood season.

十分不均匀, 各年代径流量、输沙量的年内分布基本一致, 均呈明显的“单峰”分布。径流量、输沙量各月变化趋势基本一致, 其中, 2 月处于低值, 5 月开始明显上升。径流量在 10 月达到极大值, 11 月有所减少, 12 月再次出现低值。2000 年之前输沙量的月极大值出现在 9 月, 2000 年之后出现在 10 月。不同年代径流量、输沙量主要集中在汛期(6—11 月), 输沙量的汛期占比高于径流。各年代汛期径流量占到全年径流量的 85% 以上(变化范围 88.1%~90.5%), 汛期输沙量占比高达 90%(变化范围 90.6%~93.9%)。

近 40 年来, 流域汛期水沙占全年总量的百分比

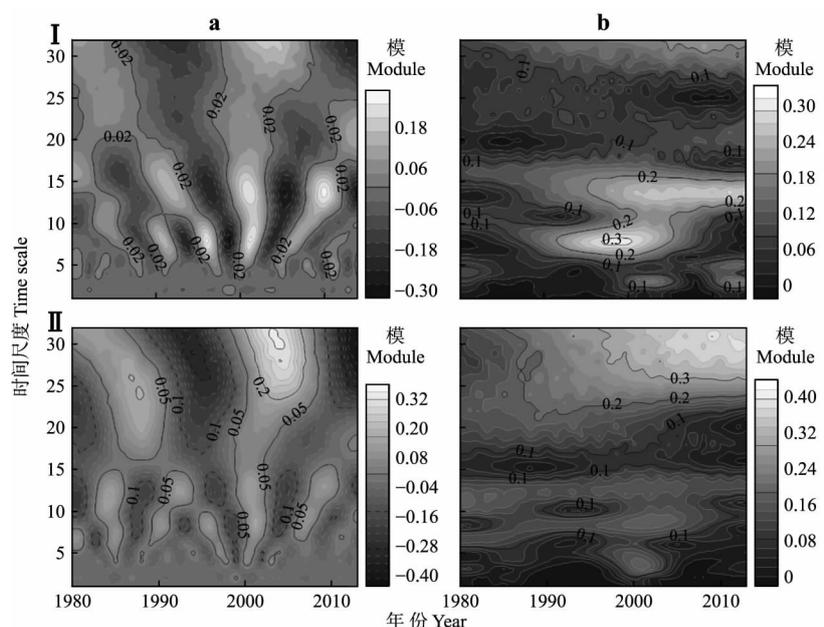


图4 径流量和输沙量标准化的小波系数(a)及小波系数模(b)等值线分布

Fig.4 Contour distributions of wavelet coefficient (a) and its modules (b) of the standardized runoff and sediment flux.

等值曲线为小波系数实部值,实线代表小波系数为正,为丰水期,虚线代表小波系数为负,为枯水期 Contour curve was the real part value of wavelet coefficient. Real line represented the wavelet coefficient was positive, indicating wet season; Dotted line represented the wavelet coefficient was negative, indicating dry season.

都有减少趋势。其中,汛期径流量的下降趋势不明显,汛期输沙量下降趋势明显,且汛期输沙量占比普遍高于径流量。

2.3 蒙河流域水沙周期性变化

由图4可以看出,流域径流量变化过程存在2类周期:12~16年的尺度,以14年为震荡中心,径流量出现丰-枯交替的准4次震荡,但在2005年之后震荡中心上移并分化成为2个震荡中心;5~11年的尺度,以8年为震荡中心,径流量出现丰-枯交替的准5次震荡,该周期变化主要活跃于1990—2005年,在2005年前后该震荡中心趋于消失,并下移形成1个3~6年尺度的周期(震荡中心为4年)。12~16年尺度具有明显的周期性变化,全域性特征显著,5~11年尺度的周期性变化次之,具有局部性特征。小波方差反映了水沙序列能量波动情况,可以用来确定演化过程中存在的主周期^[19]。径流小波方差(图5)存在2个明显的峰值,最大峰值对应14年尺度,为流域径流变化的第一主周期;8年时间尺度为流域第二主周期。根据小波系数模值反映的能量密度,可知蒙河径流序列存在 ≥ 32 年的主周期。

1980—2013年间,流域输沙量周期分别为:3~5、6~10、11~14及25~32年。25~32年尺度,以32年为尺度中心,存在2次左右的准震荡,变化稳定;11~14年尺度,以12年为尺度中心,存在4次左右

的准震荡;6~10年尺度,以9年为尺度中心,该尺度嵌套于11~14年周期变化中;3~5年尺度,以4年为尺度中心,该周期变化在1995—2005年期间较强,2005年之后趋于消失。25~32、11~14年尺度的周期性较强,具有全域性特征,其他时间尺度的周期

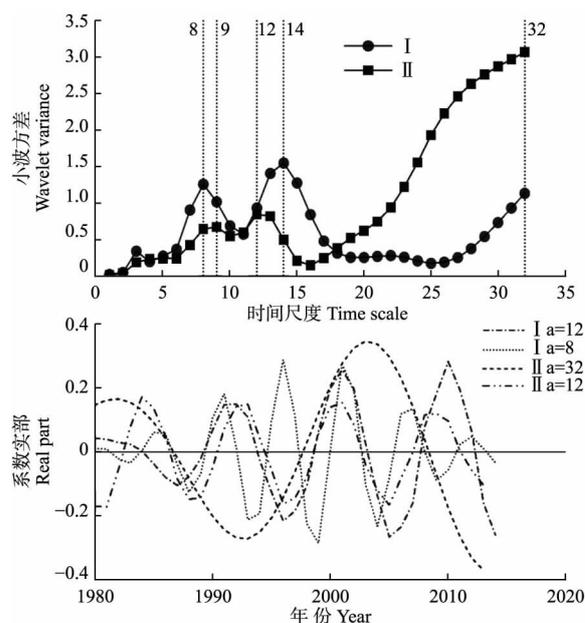


图5 径流量和输沙量小波方差及不同主周期小波实部过程线

Fig.5 Wavelet variance of runoff and sediment flux and their real part transforms for different main cycles.

性变化较弱。输沙量主周期依次为 32、12、9 及 4 年尺度,32、12 年尺度分别对应第一、第二主周期。

2.4 蒙河流域水沙 M-K 突变检验

由图 6 可以看出,蒙河流域径流在 2006 和 2011 年发生突变,输沙量突变点分别发生在 1981、1986、1999 和 2011 年。其中,1981 年为输沙量序列起始年份,且突变特征不明显,这里不作考虑。小波变化分析表明,流域径流量在第一、第二周期发生了 6 次突变: 1984 (丰-枯)、1989—1990 (枯-丰)、1998—2000 (枯-丰)、2003—2004 (丰-枯)、2007—2008 (枯-丰) 和 2010—2012 年 (枯-丰); 输沙量第一、第二周期突变点分别发生在 1986—1987、1990—1991、1997—1999、2002—2003、2007 和 2011 年。综合对比两种检验结果后认为,径流量突变点发生在 1999、2006 和 2011 年前后,突变前后径流量分别为 65.3 亿和 436 亿 m³、198 亿和 261 亿 m³、214 亿和 84.2 亿 m³,输沙量突变点发生在 1986、1999 和 2011 年前后,突变前后输沙量分别为 315 万和 142 万 t、57.2 万和 521 万 t、108 万和 34.1 万 t。

2.5 水沙变化的影响因素

2.5.1 海-气作用 蒙河流域地势低缓,容易受到从西太平洋生成经邻国越南登陆台风的影响。流域径流量主要集中在 5 月中旬到 10 月中旬,在此期间,季风及台风带来的持续性和突发性降雨往往引发水灾。厄尔尼诺-南方涛动事件(ENSO)通过季风环流

影响蒙河流域乃至整个泰国地区^[20]。由图 7 可以看出,拉尼娜规模显著的年份为 1988—1989、1996—1997、1998—2000、2008—2009 和 2011—2012 年;厄尔尼诺规模显著年份为 1981—1982、1986—1987、1991—1992、1992—1993、1993—1994、1997—1998 和 2009—2010 年。当拉尼娜发生时,对应径流量和输沙量较高的年份,厄尔尼诺发生时,对应径流量和输沙量较低年份。研究表明,厄尔尼诺年东南信风减弱,多雨区移至东太平洋附近,导致泰国出现干旱少雨现象,径流量和输沙量也随之减少;相反拉尼娜年往往给该区域带来超强降雨,发生

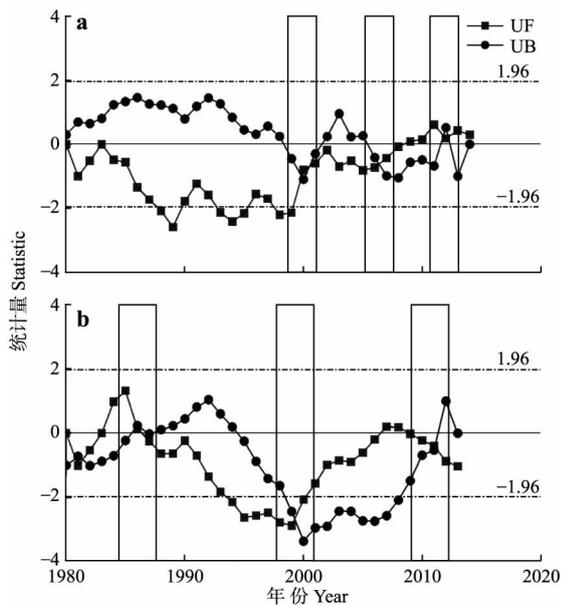


图 6 径流量 (a) 及输沙量 (b) M-K 突变点检验
Fig.6 Abrupt change points derived from M-K test for runoff (a) and sediment flux (b).
UF (UB 为时间序列 X 构造的统计量 UF and B were statistics constructed by time series X.

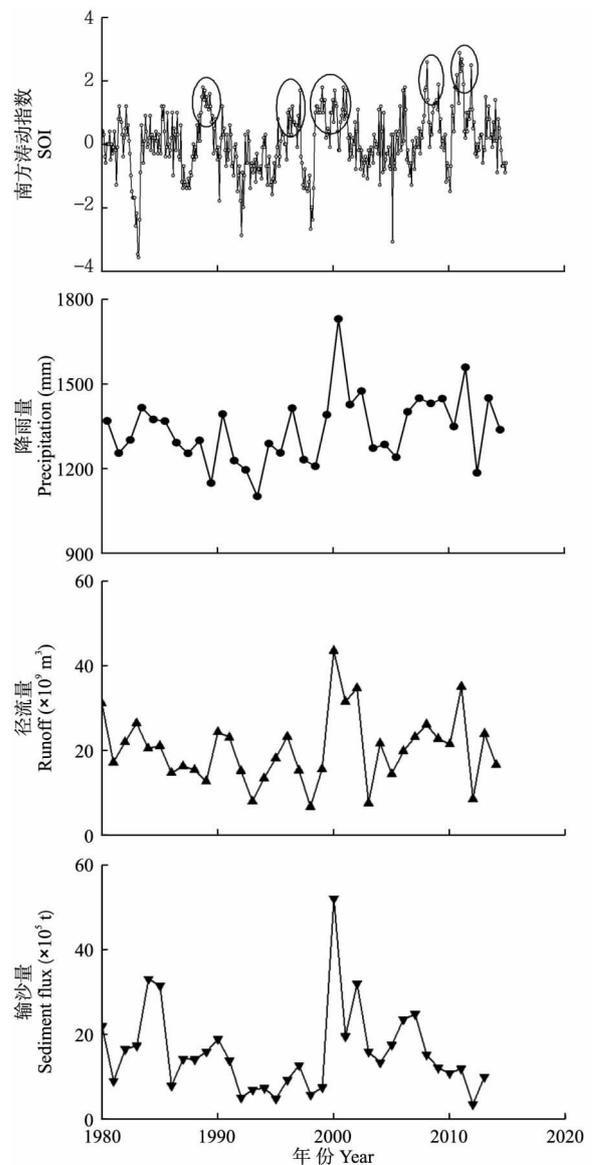


图 7 ENSO 事件与降雨及水沙变化的关系
Fig.7 Relationship of ENSO with the rainfall and the variation of runoff and sediment flux.
SOI 持续负值为厄尔尼诺年,SOI 持续正值为拉尼娜年 SOI continues to be negative indicated the El Niño year, and that continues to be positive indicated the La Niña year.

水灾^[21],尤其是2011年^[22]。

蒙河流域35年来径流量与输沙量序列都存在一定的周期性变化特征。南方涛动的周期为3~5年^[23],这与蒙河流域水沙变化的4年短周期一致。此外,地极变化时,会引起地球离心力的变化,造成大气环流和空气质量输送的变化,进而影响降水及水文要素的变化。蒙河水沙8和9年的周期变化与地极移动的波动周期7~9年一致。另外,有研究发现,地极移动存在35年左右的周期^[24],这可能是引起输沙量32年周期变化的重要原因。太阳黑子为太阳活动的核心角色,它存在的11年变化周期,与流域水沙14和12年周期变化存在一定的对应关系。因此,蒙河流域水沙的周期性变化可能是受海气相互作用下的大气环流、太阳黑子和地极移动等共同作用的影响。

2.5.2 降雨变化 蒙河作为季节性河流,其补给主要来源于降雨。本研究选择流域13个雨量站,对比不同阶段平均降雨量与径流深、输沙量变化及对应关系。由表2可以看出,降雨呈增加态势,与径流深的年际变化一致,两者显著相关,且不同时间段的径流系数基本一致。说明研究期间降雨增加是导致径流增加的原因之一。蒙河流域在1989—1997年处于干燥期,1998—2006年的降水和径流明显增加,以后的年径流随着降雨的增加而逐渐增加。

降雨和输沙量的相关性较弱。相比1980—1988年,1989—1997年降雨减少5.7%,输沙量减少42.9%,1998—2006年降雨增加4.2%,输沙量增加13.0%,2007—2013年降雨增加6.4%,输沙量却减少至1980—1988年的49.0%,产沙系数减少至

表2 流域降雨量与水沙的关系

Table 2 Relationship between precipitation and runoff-sediment

年代 Period	降雨量 Precipitation (mm)	径流深 Runoff depth (mm)	<i>r</i>	径流系数 Runoff coefficient
1980—1988	1326.7	196.6	0.732*	0.15
1989—1997	1251.6	163.1	0.806**	0.13
1998—2006	1382.7	208.4	0.895**	0.15
2007—2014	1402.9	213.1	0.959**	0.15
年代 Period	降雨量 Precipitation (mm)	输沙量 Sediment flux (t)	<i>r</i>	产沙系数 Sediment production rate
1980—1988	1326.7	1838111	0.675*	1385.5
1989—1997	1251.6	1050444	0.244	839.3
1998—2006	1382.7	2077777	0.893**	1502.7
2007—2014	1402.9	900750	0.547	637.9

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

46.0%。2006年之前,降雨与输沙量的变化一致,降雨是输沙量变化的影响因素之一;2006年以后,人类活动的影响改变了输沙过程。

2.5.3 人类活动影响 蒙河流域水沙变化与人类活动干扰具有密切关系。2000年以来,研究区主要的人类活动包括水库建设、建成区扩张和水土保持措施布设等。2000—2013年间,建设用地占地面积呈增加趋势,动态度为3.2%,水域面积大幅增加,动态度高达13.1%。相比之下,耕地和林地面积呈减小趋势,动态度分别为-0.6%和-0.9%(表3)。建设用地扩张导致下垫面条件改变,土壤压实,使土壤入渗率降低或变成不透水层。此外,流域林地面积减少,其截水能力减弱,流域产流能力提高,加剧了发生水灾的可能性。这也解释了流域径流突变均发生在1999年及以后年份。

水库大坝等工程措施对流域水沙也有重要的调节作用。目前,泰国约有97座大坝,其中,蒙河流域有45座,正在运行的主要大坝有Hua Na、LamdomYai、RasiSalai、Lam TaKhong P.S.等。20世纪90年代,泰国东部和东北部修建了一系列大坝,累计库容达69.75亿 m^3 。2000年以来大坝数量增加了17个,累计库容达94.96亿 m^3 。截至2014年,泰国水库蓄水总量约为272.41亿 m^3 。1997年建于蒙河流域下游乌汶省空坚县的Pak Mun大坝正式投入使用,该坝高17 m、宽300 m,对流域水沙产生重要影响,被评为“最失败的大坝”。水库和大坝运行后,对水沙的年内分布产生影响,导致汛期径流量和输沙量有所减少。同时大坝拦截了上游的大量泥沙,抵消了森林破坏对输沙量增加的影响。此外,蒙河流域水沙突变点除1986年外,其余的突变点均出现在20世纪90年代以后,这是人类活动对水沙变化影响逐渐增强的体现。因此,可以认为2000年以前蒙河降雨—径流的变化直接导致了输沙量的变化,而2000年以后水利工程建设对输沙量有明显的减少

表3 蒙河流域2000—2013年土地利用变化

Table 3 Land use change in the Mun River Basin during 2000—2013

土地利用类型 Land use type	比例 Percentage (%)			2000—2013 年动态度 Dynamic degree during 2000—2013 (%)
	2000	2007	2013	
建设用地 Construction land	4.6	5.9	6.1	3.2
耕地 Arable land	77.7	73.5	73.5	-0.6
林地 Forest	14.0	13.2	12.7	-0.9
水域 Water	1.8	3.3	3.8	13.1

作用,尤其是 2006 年以来。

3 结 论

本研究采用 M-K 趋势检验和小波分析变化等方法,对东南亚泰国地区蒙河流域乌汶水文站 1980—2010 年的水沙特征及影响因素进行分析,得到了以下结论:

1) 蒙河流域年径流量呈微弱增加趋势,输沙量呈减少趋势。2000—2014 年的平均径流量约为 1980—1999 年的 1.3 倍;2000 年径流量为 35 年最高值,为最小值(1998 年)的 6.7 倍。2000 年以前输沙量与径流量变化趋势一致,但 2000 年以来输沙量显著减少,年均递减系数为-32.4 万 t。流域水沙年内分布不均匀,近 40 年来汛期径流量和输沙量均呈下降趋势。

2) 蒙河流域水沙周期变化呈现丰枯交替的位相特征。年径流量变化存在 3~6、5~11、和 12~16 年的变化周期,其中,12~16 年的震荡周期具有全域性。年输沙序列存在 3~5、6~10、11~14 和 25~32 年的周期变化,25~32 和 11~14 年的震荡周期具有全域性。水沙的主周期依次为 14、8、4 及 32、12、9、4 年。这些周期及其变化与南方涛动、地极移动和太阳黑子活动等因素密切相关,但近年来人类活动在一定程度上扰乱了水沙变化的周期性特征。

3) 蒙河流域径流量的突变点分别为 1999、2006 和 2001 年,而输沙量的突变点为 1986、1999 和 2011 年。受气候变化及人类活动影响,输沙量变化明显比径流量变化更复杂,水沙突变点发生的时间并不完全一致。

4) 径流量与输沙量具有显著的相关关系。降雨强度、ENSO 事件的强度和规模是流域水沙变化的重要影响因素,而人类活动如水利工程建设和土地利用变化是 2000 年以来输沙量显著减少的主要原因。

参考文献

- [1] 任宗萍,张光辉,杨勤科. 近 50 年延河流域水沙变化特征及其原因分析. 水文, 2012, **32**(5): 81-86 [Ren Z-P, Zhang G-H, Yang Q-K. Characteristics of runoff and sediment variation in Yanhe River Basin in last 50 years. *Journal of China Hydrology*, 2012, **32**(5): 81-86]
- [2] Gebremicael TG, Mohamed YA, Betrie GD, et al. Trend analysis of runoff and sediment fluxes in the Upper Blue Nile basin: A combined analysis of statistical tests, physically-based models and land use maps. *Journal of Hydrology*, 2013, **482**: 57-68
- [3] Wu C, Ji C, Shi B, et al. The impact of climate change and human activities on streamflow and sediment load in the Pearl River basin. *International Journal of Sediment Research*, 2019, **34**: 307-321
- [4] Valentin C, Agus F, Alamban R, et al. Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, **128**: 225-238
- [5] Meade R, Moody J. Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system, 1940-2007. *Hydrological Processes*, 2010, **24**: 35-49
- [6] Walling DE, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, **39**: 111-126
- [7] 任惠茹,李国胜,崔林林,等. 近 60 年来黄河入海水沙通量变化的阶段性与多尺度特征. 地理学报, 2014, **69**(5): 619-631 [Ren H-R, Li G-S, Cui L-L, et al. Phases and periodic changes of water discharge and sediment load from the Yellow River to the Bohai Sea during 1950-2011. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(5): 619-631]
- [8] 张晓艳,刘梅先. 气候变化及人为活动对湘江流域径流和输沙的影响. 水土保持研究, 2018, **25**(1): 30-37 [Zhang X-Y, Liu M-X. Effects of climate change and human activities on water and sediment discharge in Xiangjiang Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(1): 30-37]
- [9] Zhang Q, Xu CY, Becker S, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years. *Journal of Hydrology*, 2006, **331**: 511-523
- [10] Wang SA, Fu BJ, Piao SL, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, **9**: 38-41
- [11] 王雁,丁永建,叶柏生,等. 黄河与长江流域水资源变化原因. 中国科学: 地球科学, 2013, **43**(7): 1207-1219 [Wang Y, Ding Y-J, Ye B-S, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008. *Science China: Earth Sciences*, 2013, **43**(7): 1207-1219]
- [12] 吴创收,杨世伦,黄世昌,等. 1954—2011 年间珠江入海水沙通量变化的多尺度分析. 地理学报, 2014, **69**(3): 422-432 [Wu C-S, Yang S-L, Huang S-C, et al. Multi-scale variability of water discharge and sediment load in the Pearl River during 1954-2011. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(3): 422-432]
- [13] 张加琼,马波,税军峰,等. 泰国北部山区土壤侵蚀调查报告. 水土保持通报, 2019, **39**(1): 1-8 [Zhang J-Q, Ma B, Shui J-F, et al. Investigation report on soil erosion in northern mountain area of Thailand. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(1): 1-8]
- [14] Prabnakorn S, Maskey S, Suryadi FX, et al. Rice yield in response to climate trends and drought index in the Mun River Basin, Thailand. *Science of the Total Environment*, 2018, **621**: 108-119

- [15] Liang B, Han G, Liu M, *et al.* Spatial and temporal variation of dissolved heavy metals in the Mun River, Northeast Thailand. *Water*, 2019, **11**: 380
- [16] Han Z, Long D, Fang Y, *et al.* Impacts of climate change and human activities on the flow regime of the dammed Lancang River in Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2019, **570**: 96–105
- [17] 王蕊, 姚治君, 刘兆飞. 西北干旱区气候和土地利用变化对水沙运移的影响——以小南川流域为例. 应用生态学报, 2018, **29**(9): 2879–2889 [Wang R, Yao Z-J, Liu Z-F. Impacts of climate and land use change on water and sediment load in the Northwest arid region, China: With Xiaonanchuan River Basin as a case. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(9): 2879–2889]
- [18] 秦丽欢, 周敬祥, 李叙勇, 等. 密云水库上游径流变化趋势及影响因素. 生态学报, 2018, **38**(6): 1941–1951 [Qin L-H, Zhou J-X, Li X-Y, *et al.* Attribution analysis of changes in runoff in the upstream of the Miyun Reservoir. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(6): 1941–1951]
- [19] 刘雅各, 袁凤辉, 王安志, 等. 长白山生态功能区气候变化特征. 应用生态学报, 2019, **30**(5): 1503–1512 [Liu Y-G, Yuan F-H, Wang A-Z, *et al.* Characteristics of climate change in Changbai Mountain ecological functional area, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(5): 1503–1512]
- [20] Muangsong C, Cai B, Pumijumnong N, *et al.* An annually laminated stalagmite record of the changes in Thailand monsoon rainfall over the past 387 years and its relationship to IOD and ENSO. *Quaternary International*, 2014, **349**: 90–97
- [21] Ueangawatt K, Nilsamranchit S, Jintrawet A. Fate of ENSO phase on upper Northern Thailand: A case study in Chiang Mai. *Agriculture & Agricultural Science Procedia*, 2015, **5**: 2–8
- [22] 司东, 李修仓, 任福民, 等. 2011 年全球重大天气气候事件及其成因. 气象, 2012, **38**(4): 480–489 [Si D, Li X-C, Ren F-M, *et al.* Global significant weather and climate events in 2011 and the possible causes. *Meteorological Monthly*, 2012, **38**(4): 480–489]
- [23] 郭彦, 侯素珍, 王平, 等. 基于小波分析的黄河上游水沙多时间尺度特征. 干旱区研究, 2015, **32**(6): 1047–1054 [Guo Y, Hou S-Z, Wang P, *et al.* Multi-time scale characteristics of runoff and sediment series based on wavelet analysis in the upper reaches of Yellow River. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(6): 1047–1054]
- [24] 彭公炳, 陆巍, 殷延珍. 地极移动与气候的几个问题. 大气科学, 1980, **4**(4): 369–378 [Peng G-B, Lu W, Yin Y-Z. Some problems about the earth pole shift and climate. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1980, **4**(4): 369–378]

作者简介 李朝月, 男, 1994 年生, 硕士研究生。主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: licy.17s@igsnr.ac.cn

责任编辑 杨弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

